

STUDI DISTRIBUSI SUHU API DENGAN TEKNIK FOTOGRAFI SPECKLE MENGGUNAKAN LASER He-Ne

Karyono¹⁾, Makmur Sirait²⁾ dan Anwar Dhani³⁾

INTISARI

Telah dilakukan pengukuran suhu nyala api dengan fotografi speckle. Pola speckle direkam pada Kodak Technical Pan Film dengan menempatkan pembakar antara difuser dan film. Pemotretan dilakukan dua kali pada film yang sama (double exposure), yaitu sebelum dan sesudah ada nyala api. Dengan adanya perbedaan indeks bias dalam nyala api dan medium, maka kedua pola acak speckle yang direkam bergeser satu terhadap yang lain. pergeseran rekaman ini dapat bersifat celah ganda setelah film tersebut dicuci. Dengan pengamatan pola interferensi yang terjadi, suhu bagian nyala api dapat ditentukan dengan cara membandingkan terhadap suhu referensi.

Pada percobaan ini digunakan nyala api dari gas elpiji yang dihubungkan engan pembakar Meker. Kesalahan pengukuran suhu nyala api lebih kecil dibanding perekaman tanpa lensa.

STUDY OF FLAME TEMPERATURE DISTRIBUTION USING He-Ne LASER SPECKLE PHOTOGRAPHY

Karyono¹⁾, Makmur Sirait²⁾ dan Anwar Dhani³⁾

ABSTRACT

Temperature measurement of flame has been done by means of speckle photography.. The speckle has been recorded using Kodak Technical Pan Film by putting the burner between the diffuser and the film. Recording was done twice on the same film (double-exposures), before and after the flame is introduced. Due to the difference between the refractive index of the flame and the medium, the random speckles recorded are shifted respect one to another. The recorded shifting has a property of a double slit after processing. From the interference pattern, the temperature of the flame can be determined by comparing with the reference temperature.

This experiment uses of flame from LPG gas connected to Meker burner. This error of the temperature measurement using lens is smaller than without lens .

¹⁾ Staff pengajar FMIPA UGM Yogyakarta

²⁾ Staff Pengajar FPMIPA IKIP MEDAN

³⁾ Staff pengajar FMIPA UGM Yogyakarta

I. PENDAHULUAN

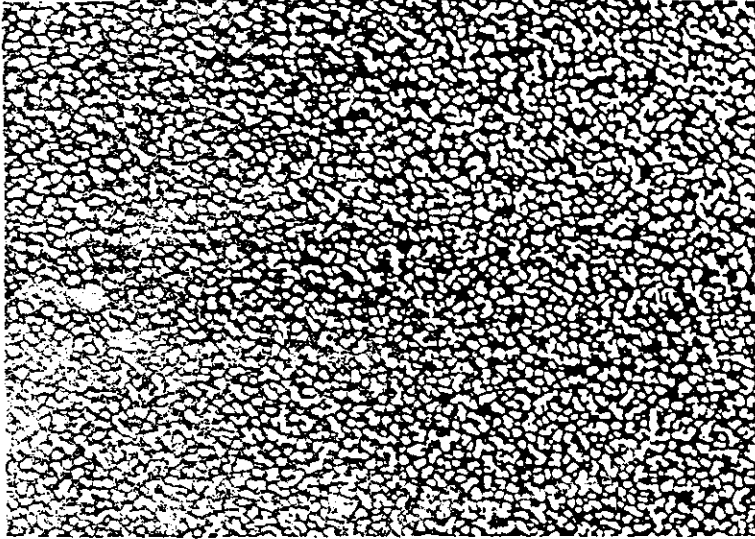
Laser dikenal sebagai sumber cahaya yang memiliki beberapa keunggulan, yaitu bersifat koheren, intensitas kuat, dan monokromatis. Keunggulan cahaya laser di atas memungkinkan penerapan laser sebagai sumber cahaya unggul yang dapat digunakan dalam bidang-bidang penelitian antara lain bidang pengukuran, spektroskopi, komunikasi optik, industri dan ilmu kedokteran.

Pada penelitian ini, aplikasi laser digunakan dalam bidang pengukuran, yaitu pengukuran temperatur nyala api dari proses pembakaran. Proses pembakaran gas berbentuk nyala api akan menghasilkan temperatur tinggi, dalam orde ratusan derajat celcius. Alat ukur untuk mengukur suhu yang tinggi, biasanya digunakan termokopel dari berbagai jenis bahan tergantung pada besarnya suhu yang akan diukur. Pengukuran distribusi suhu nyala api telah dilakukan oleh beberapa peneliti, antara lain dengan metode moire deflectometry (Keren dkk, 1981), metode interferometri (South dan Hayward, 1976)

Dalam penelitian ini penulis melakukan pengukuran suhu dengan teknik fotografi speckle dan menggunakan laser He-Ne sebagai sumber cahaya. Speckle adalah pola titik-titik kecil gelap dan terang yang dihasilkan dari sinar laser yang dipantulkan atau ditransmisikan lewat difuser (Vest, 1979). Pengukuran dilakukan dengan menentukan pola interferensi yang dibentuk oleh specklegram dan diamati pada layar pengamatan.

II. TEORI DASAR

Pola speckle yang dihasilkan dari berkas sinar laser yang ditransmisikan oleh kaca tebal 1mm yang kedua permukaannya baur merata (difuser) ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pola acak speckle yang dihasilkan difuser. (Sirait, 1994)

Jika pola acak terbentuk oleh permukaan kasar yang disinari secara merata dengan lebar L , maka dua titik yang berjarak l akan memberikan ukuran bercak (frekuensi ruang rumbai) $f = l / (\lambda z)$, dengan z adalah jarak antara lensa dengan layar (tempat speckle) dan λ adalah panjang gelombang berkas laser. Pola acak mempunyai frekuensi maksimum apabila kedua titik tersebut pada ujung-ujung permukaan kasar, $f = L / (\lambda z)$ (Vest, 1979).

Frekuensi rata-rata pola acak adalah :

$$\langle f \rangle = 1/3 f_{\max} = 1/3 \left(\frac{L}{\lambda z} \right) \quad (1)$$

Distribusi intensitas pada pola speckle dinyatakan sebagai berikut :

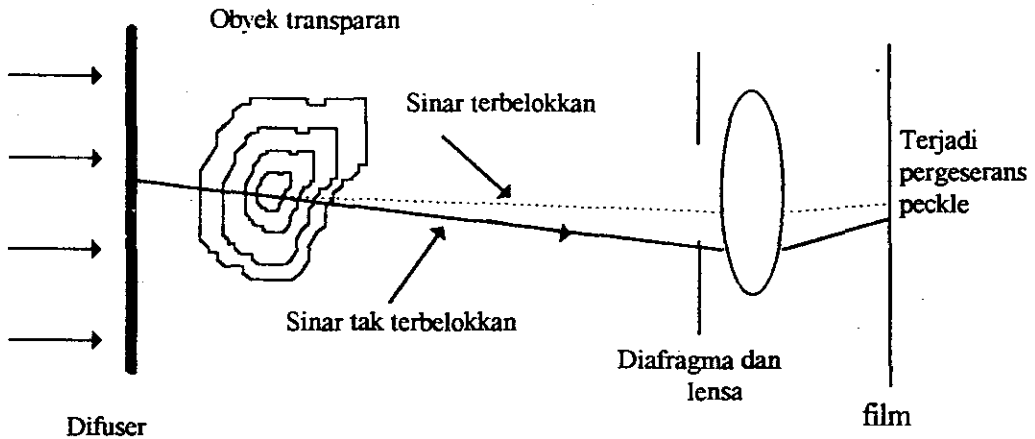
$$I(y) = 1 + \cos 2 \pi \left(\frac{Ly}{3\lambda z} \right) \quad (2)$$

Ukuran bercak speckle dinyatakan sebagai jarak antara titik-titik yang memberikan harga I satu setengah dari harga maksimum (Vest, 1979) :

$$b_s = 1,5 \left(\frac{\lambda z}{L} \right) \quad (3)$$

Untuk berbagai keperluan, ukuran bercak speckle dapat ditentukan oleh diameter lensa yang digunakan. Pola acak speckle yang dibentuk pada jarak z dari lensa dan diameter lensa D , memberikan ukuran speckle $b_s = 1,22 \cdot \left(\frac{\lambda z}{D} \right)$

Pada penelitian ini digunakan metoda speckle akibat pembiasan objek transparan. Objek transparan diletakkan di depan difuser seperti ditunjukkan gambar 2.



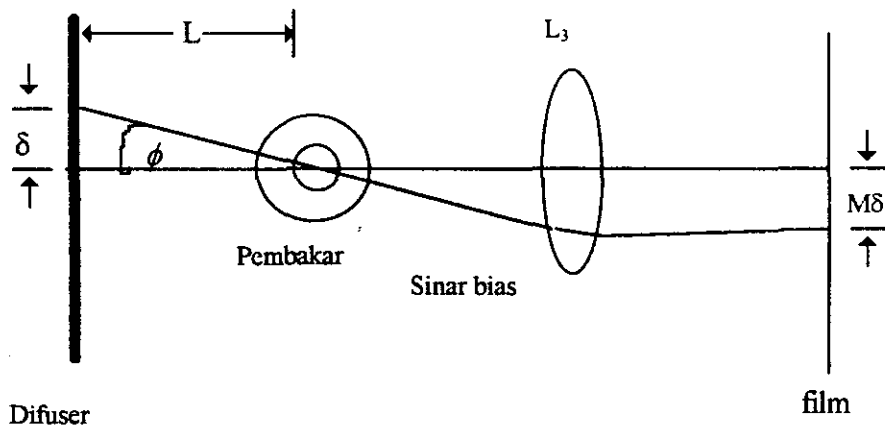
Gambar 2. Proses perekaman pola speckle (Vest, 1979).

Sebelum objek dipasang, pola acak speckle akan terbentuk pada bidang film kamera yang merupakan citra dari difuser yang dibentuk oleh lensa. Objek ditempatkan antara difuser dan lensa, dimana indeks bias objek transparan bervariasi di setiap titik, baik perubahan kontinu maupun tak kontinu. Karena

pembiasan oleh objek, maka pola acak speckle pada bidang film akan mengalami pergeseran kedudukan dari keadaan pola speckle tanpa objek. Pemotretan ganda (double-exposures) dilakukan untuk merekam pergeseran pola acak speckle. Pemotretan pertama dilakukan tanpa objek dan pemotretan kedua dengan objek pada film yang sama.

Hasil rekaman pada film, setelah film dikembangkan atau dicuci disebut specklegram. Specklegram rekaman ganda bersifat seperti celah ganda. Jarak celah ganda sama dengan jarak pergeseran speckle dan mengandung informasi tentang indeks bias pada objek tembus cahaya. Bila specklegram disinari dengan berkas cahaya maka dapat diamati pergeseran speckle titik demi titik.

Pembiasan berkas cahaya yang melalui daerah nyala api disebabkan oleh gradien indeks bias pada nyala api yang diinterpretasikan sebagai pergeseran speckle pada bidang film (gambar3).



Gambar 3. Pembiasan akibat gradien indeks bias pada pembakar.

Jika δ adalah pergeseran speckle pada bidang difuser yang berhubungan dengan sudut bias ϕ , untuk sudut bias ϕ kecil maka :

$$\delta = L' \tan \phi \approx L' \phi \quad (4)$$

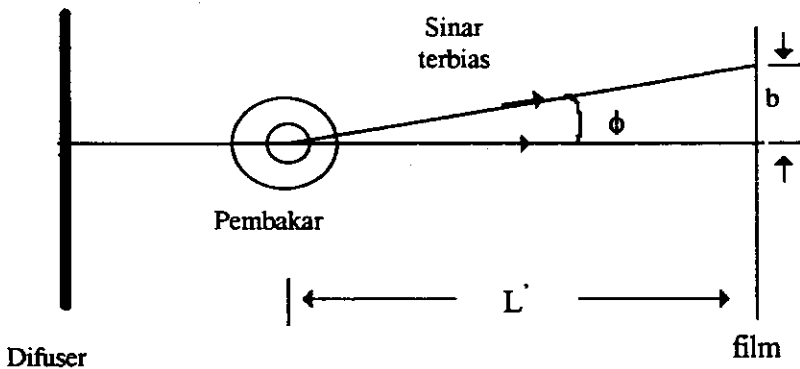
dengan L' adalah jarak antara difuser dan pusat pembakar. Perekaman dengan menggunakan lensa L_3 akan memberikan pergeseran pada bidang film sebesar $M\delta$ dengan M merupakan perbesaran sistem pembentuk citra yang menggunakan lensa L_3 . Pergeseran $M\delta$ menghasilkan pada specklegram dua citra yang bersifat celah ganda. Dengan menggunakan persamaan (4) maka pergeseran speckle dapat ditulis menjadi :

$$\delta = \frac{\lambda z}{Md} \quad (5)$$

dengan z , jarak specklegram dengan layar pengamatan pada rekonstruksi dan d , jarak frinji yang bersebelahan pada layar pengamatan. Dari persamaan (4), maka sudut pembiasan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\phi = \frac{\delta}{L} \quad (6)$$

Jika perekaman dilakukan tanpa menggunakan lensa L_3 , maka akan terdapat pergeseran pola speckle pada bidang film sebesar b (gambar 4).



Gambar 4. Pergeseran pola speckle akibat gradien indeks bias pada pembakar.

Pergeseran speckle pada bidang film ini dapat dinyatakan sebagai

$$b = L' \tan \phi \approx L' \phi \quad (7)$$

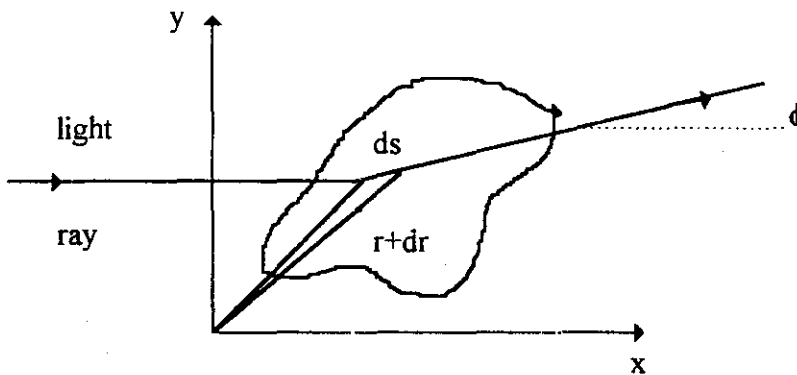
dengan L' , jarak pusat pembakar ke film dan ϕ , sudut bias. Pada proses analisa , pergeseran speckle pada film berfungsi sebagai selah ganda. Dari teori dasar interferensi dan persamaan (7) diperoleh sudut bias ϕ sebesar :

$$\phi = \frac{\lambda z}{L'd} \quad (8)$$

Hubungan antara lintasan sinar dengan indeks bias medium dapat dituliskan sebagai (Vest, 1979, Born dan Wolf, 1987) :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (9)$$

dengan r , vektor posisi, s , panjang lintasan sinar diukur dari titik referensi dan $\nabla = i \partial/\partial_x + j \partial/\partial_y + k \partial/\partial_z$. Untuk sistem koordinat kartesian, x terletak sepanjang sumbu optik (gambar 5) dan y adalah sumbu tegak lurus terhadap x . Sudut bias ϕ dinyatakan oleh komponen j dari $\partial r / \partial s$. Untuk sudut bias kecil ϕ kecil atau sinar paraksial yaitu sinar yang dekat dan hampir sejajar sumbu optik , berlaku $ds \approx dx$.



Gambar 5. Sinar melalui medium tembus cahaya (Bar-Ziv dkk, 1983)

Persamaan (9) dapat dituliskan dalam dua dimensi yaitu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(n \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial y} \quad (10)$$

Persamaan (10) diintegrasikan terhadap x akan menghasilkan

$$n \frac{\partial y}{\partial x} = \int_{x_0}^{x_e} \frac{\partial n}{\partial y} dx \quad (11)$$

Untuk objek yang simetris radial $n(x,y)$ dapat ditulis sebagai $n(r)$ dengan harga $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$. Persamaan (11) dituliskan dalam koordinat silinder, akan diperoleh persamaan sudut bias ϕ sebesar :

$$\phi - \phi_0 = \frac{2}{n_0} \int_y^{y_0} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{\partial r}{(r^2 - y^2)^{1/2}} dy \quad (12)$$

yaitu ϕ pada indeks bias n_0 tersebut. Harga $\phi = \phi(r)$ adalah harga yang diberikan persamaan (6) atau (7). Dengan menggunakan inversi transformasi Abel (Bracewell, 1978), maka persamaan (21) dapat dituliskan menjadi :

$$n(r) - n_0 = -\frac{n_0}{n} \int_r^q \frac{(\phi - \phi_0)}{(y^2 - r^2)^{1/2}} dy \quad (13)$$

q adalah batas atas integrasi, dengan harga ϕ masih dapat ditentukan dari persamaan (6) atau persamaan (8). Jika $q = r + h$ dimana h adalah interval integrasi sepanjang mana harga ϕ adalah konstan, sehingga harga ϕ dapat keluar dari tanda integrasi. Maka hubungan indeks bias relatif dengan sudut bias dapat ditulis menjadi :

$$\frac{n(r) - n_0}{n_0} = \frac{(\phi - \phi_0)}{\pi} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{h}{r} \right) \quad (14)$$

Indeks bias arah radial dapat diinterpretasikan sebagai profil suhu arah radial. Dalam proses pembakaran gas, perbedaan indeks bias hasil pembakaran ini kecil sehingga efek konsentrasi gas diabaikan. Suhu arah radial ditentukan dari persamaan Lorenz-Lorentz yang diterapkan pada gas ideal.

Harga molar refractivity A dituliskan sebagai (Born dan Wolf, 1987 dan Guenther, 1990) :

$$A = \frac{W}{\rho} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) = \frac{RT}{P} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \quad (15)$$

dengan W = berat molekul, ρ = rapat massa zat, n = indeks bias zat, T = suhu absolut, P = tekanan gas dan R = konstante gas. Untuk menghitung indeks bias udara pada 632,8 nm digunakan formula Chauchy yaitu :

$$n - 1 = A_1 \left(1 + B_1 / \lambda^2 \right) \quad (16)$$

dengan A_1 dan B_1 adalah konstanta dari formula Chauchy. Dengan menggunakan persamaan (15), indeks bias udara pada panjang gelombang 632,8 nm adalah 1,000292, maka diperoleh harga molar refractivity A adalah $4,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Hubungan suhu dengan indeks bias dapat dituliskan (Patrick dkk, 1984) :

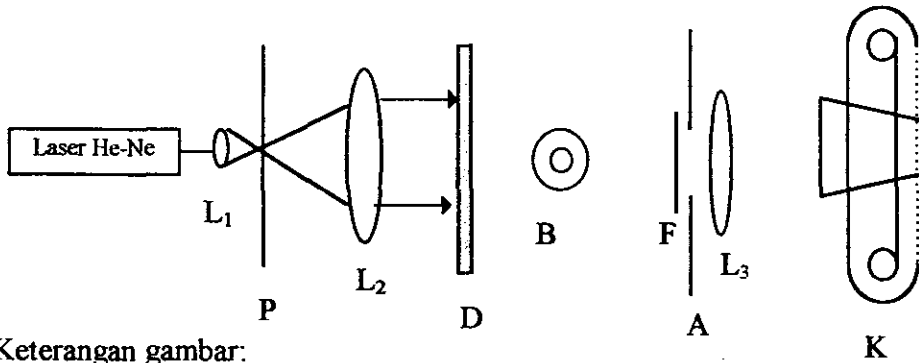
$$T = \frac{T_o}{\left\{ (n - n_o) / n_o \right\} \left\{ (3PA + 2RT_o) / 3PA \right\} + 1} \quad (17)$$

dengan T_o adalah suhu referensi pada indeks bias n_o .

III. CARA PENELITIAN

Dalam penelitian ini, sebagai cuplikan adalah objek yang tembus cahaya yang dalam hal ini adalah nyala api (flame) dari gas elpiji yang keluar dari pembakar. Filter yang digunakan adalah filter merah yang berfungsi untuk meloloskan speckle pada panjang gelombang laser He-Ne. Pemotretan ganda (double-exposures) dilakukan untuk merekam pergeseran pola acak speckle.

Susunan peralatan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 6.



Keterangan gambar:

- | | |
|-------------------------------|-------------|
| L : Mikroskop objektif | B : Burner |
| P : Lubang Jarum (pinhole) | F : Filter |
| L_y : Lensa Kolimator | A : Apertur |
| L_3 : Lensa pembentuk citra | D : Difuser |
| K : Kamera. | |

Gambar 6. Skema rangkaian percobaan. (Sirait, 1994)

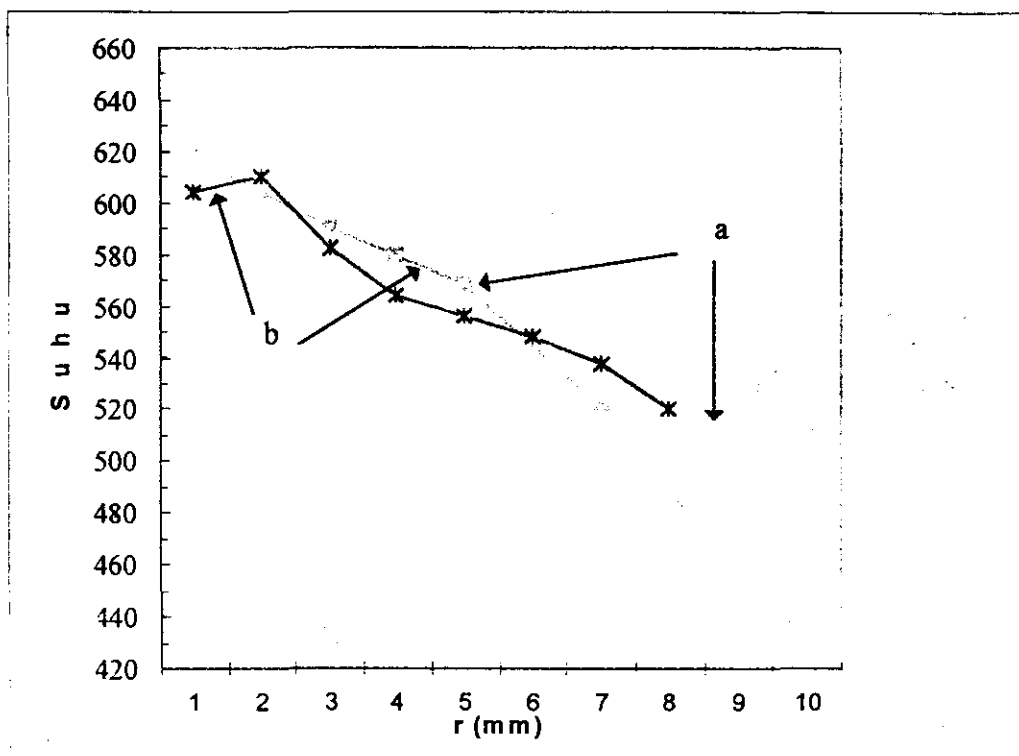
Pemotretan pertama dilakukan pada saat pembakar belum dinyalakan dan pemotretan kedua setelah ada nyala api pada film yang sama. Pemotretan berlangsung di ruang gelap dan waktu pencahayaan adalah $1/500$ detik. Waktu pencahayaan ini dipilih untuk mengurangi pengaruh getaran dan gangguan aliran udara. Kemudian film diproses dengan cara memasukkan ke dalam larutan developer D-76.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Specklegram dapat bersifat sebagai celah ganda yang jaraknya sama dengan pergeseran speckle. Bila specklegram disinari dengan berkas laser maka dapat diamati pola interferensi Young pada layar pengamatan.

Perioda pola interferensi yang terjadi pada layar pengamatan diukur dengan menggunakan mikrometer sekrup. Kurve distribusi nyala api sebagai fungsi

jarak dengan perekaman menggunakan jensa dan tanpa lensa ditunjukkan pada gambar 7 .



Gambar 7. Kurve distribusi nyala api dengan perekaman
 a) menggunakan lensa dengan $M = 1,83$; $z = 300$ mm dan $L = 90$ mm
 b) tanpa lensa dengan $z = 650$ mm dan $L' = 230$ mm

Dari hasil percobaan didapat bahwa pola interferensi yang masih dapat diamati hanya sampai dengan $r = 9$ mm untuk perekamam menggunakan lensa dan $r = 8$ mm untuk perekaman tanpa lensa pembentuk citra. Untuk $r > 9$ mm pola akhirnya menjadi sangat kabur, sehingga pengukuran akan memberikan hasil yang kurang memuaskan. Dari gambar 7 terlihat bahwa untuk $r = 7$ mm memberikan hasil yang sesuai dengan hasil pengukuran termokopel. Daerah diluar harga 7 mm memberikan penyimpangan yang lebih besar dari 4%. Penyimpangan ini diakibatkan oleh intensitas cahaya yang semakin lemah dan pengaruh gangguan udara luar. Disamping itu juga pengukuran jarak terang-terang

menjadi kurang teliti karena jarak yang makin besar dan semakin kabur. Penyimpangan hasil pengukuran dengan perekaman menggunakan lensa adalah 12°C dan 13°C untuk perekaman tanpa lensa, pada daerah suhu 489°C sampai 642°C .

V. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Dengan fotografi speckle dapat digunakan untuk mengetahui distribusi suhu disekitar sumber panas yang transparan dengan ketelitian yang cukup baik.
2. Perekaman dengan menggunakan lensa, memberikan penyimpangan pengukuran suhu lebih kecil dibanding perekaman tanpa lensa.
3. Untuk memperoleh ketelitian yang lebih baik maka harus digunakan film yang resolusinya tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bar-Ziv. E, Sgulim. S, Kafri. O, Keren. E, 1983, *Temperature mapping in flames by moire deflectometry*, Applied Optics, Vol. 22, Hal. 698-705.
- Born. M dan Wolf E, 1987, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford.
- Bracewell, R., 1978, *The Fourier Transform and Its Applications*, McGraw-Hill, New York, Hal. 262-266.
- Guenther. R, 1990, *Modern Optics*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Keren. E, Bar-Ziv. E, Glatt. I, dan Kafri. O, 1981, *Measurement of Temperature Distribution of Flames by Moire Deflectometry*, Applied Optics, Vol. 20, Hal. 4263-4266.

- Patrick. V, Farrell dan Hofeldt. D.L, 1984, *Temperature Measurement in Gases Using speckle Photography*, Applied Optics, Vol. 23, Hal. 1055-1059.
- Sirait M., 1994, *Pengukuran Suhu Api dengan Menggunakan Laser He-Ne*, Tesis S2, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- South. R dan Hayward. B.M, 1976, *Temperature Measurement Conical Flames by Laser Interferometry*, Combustion Science and Technology, Vol.12, Hal. 183-195.
- Vest, C.M, 1979, *Holographic Interferometry*, John Wiley & Sons, New York.

MILIK PERPUSTAKAAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN
ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS GADJAH MADA